

적정 포장설계를 위한 과실의 바이오 허용 충격지수 추정

김기석 정현모 김기복 김만수

Estimation of the Allowable Bio-shock Fragility Index of Fruits for Optimum Packaging Design

G. S. Kim H. M. Jung K. B. Kim M. S. Kim

Abstract

Physical damage to fruits and vegetables caused by shock degrades the value of product in the fresh market. In order to design a product/packaging system to protect the product, the G-factor to the product that causes shock damage needs to be determined. The shock fragility of organisms such as fruits with a concept correspondent to the G-factor of industrial products was calculated and we defined the allowable bio-shock fragility index as the value divided peak acceleration that was generated in safe drop height by standard acceleration of gravity. We did modeling for safe drop height that would prevent fruits from damage by drop tests and tried to estimate the allowable bio-shock fragility index of pears and apples for optimum packaging design. The bio-shock fragility index of pears was in the range of 0.74~2.29 G, while apples had a slightly higher value than that of pears, of 0.51~2.98 G. This result shows accordance with the general fact that apples have a firmer structure and get less damage from the same impact. Based on this result, it is possible to create an optimum packaging design by providing a damage standard by impact.

Keywords : G-factor, Shock fragility, Allowable bio-shock fragility index, Pears, Apples

1. 서론

현재 국민생활수준의 향상과 소득의 증가로 인하여 과실에 대한 구매 패턴이 다양해지고 있다. 기존의 양적인 소비 패턴보다 품질의 중요성을 소비자들이 인식하고, 고품질의 제품을 선호하는 경향이 대두되고 있다. 또한 대외 시장의 개방화에 따라 수입 농산물이 증가하게 되었으며 이에 대한 경쟁력을 강화하기 위해 고품질 농산물의 생산과 생산된 농산물의 유통 중 손상을 최소화하여야 한다.

일반 공산품의 경우 운송 중 심한 진동이나 충격에 의한 제품의 파손을 방지하기 위하여 허용 충격가속도(shock fragility)

의 크기를 규정하고 있는데, 여기에 G-factor를 사용하고 있으며, 그 정의는 충격으로 제품이 파손되지 않는 정점가속도를 표준 중력가속도(9.81 m/s^2)로 나눈 값으로 말하고 있다. 따라서 과실과 같은 생물체에서도 공산품의 G-factor에 대응하는 개념으로 과실이 일정한 높이에서 낙하하여 손상을 입지 않을 허용 충격가속도의 기준을 정할 수 있을 것이다. 과실의 낙하 충격실험을 통하여 과실이 손상을 입지 않는 안전 낙하높이를 구하고 이 높이에서 과실을 낙하시켜 충격으로 발생하는 정점가속도를 구할 수 있으며, 이것이 허용충격가속도가 되는 것이다. 여기서는 과실의 안전 낙하높이에서 낙하시켜 충격으로 발생하는 정점가속도(peak acceleration)를

This study was conducted by the research fund supported by Ministry of Agriculture and Forest. The article was submitted for publication in September 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in December 2007. The authors are Ghi Seok Kim, Researcher, KSAM member, Man Soo Kim, Professor, KSAM member, Division of Bioresources Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea, Hyun Mo Jung, Professor, KSAM member, Dept. of Packaging Management, Kyongbuk College of Science, Waeguan, Korea, Ki Bok Kim, Senior Researcher, KSAM member, Division of Metrology for Quality Life, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea. Corresponding author: M. S. Kim, Professor, Division of Bioresources Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea; Fax: +82-42-823-6246; E-mail: <mskim@cnu.ac.kr>.

표준 중력가속도로 나눈 값을 바이오 허용 충격지수(allowable bio-shock fragility index)로 정의하였다.

Rohrbach(1975)는 블루베리를 충격용 트랜스듀서에 낙하하여 힘-시간곡선 상에서 최대충격력(f_p), 초기 기울기와 총 접촉시간(t_c)을 구하여 블루베리의 질감이 변하는 것에 대한 연구를 수행하였다. Rohrbach 등(1982)은 블루베리의 firmness에 대해 최대충격력(f_p)과 최대충격력까지의 시간(t_p)을 이용한 충격지수인 $f_p/(t_p)^2$, t_p 와의 상관성을 연구하였다. Delwiche 등(1989)은 복숭아의 firmness, $f_p/(t_p)^2$, t_p 에 의해 세 가지 종류로 분류하는 충격력 분류기를 설계하였다. Zhang 등(1994)은 복숭아의 firmness가 f_p/t_p 와 t_c 에 밀접한 연관이 있음을 보여주었으며 다른 연구들에서 자두의 숙성정도를 f_p/t_p 와 t_c 를 이용하여 결정하였고 또한 Wan 등(1997)은 포도의 숙성정도는 t_p 와 t_c 에 의해 결정하였다. Delwiche and Sarig(1991)와 Reyes 등(1996)은 과실을 트랜스듀서 위에 자유낙하 시킬 경우, 과실의 질량과 접촉면의 곡률로 인해 과실의 질감이 변하는 것을 확실히 반영할 수 없으므로 과실을 수직 또는 수평으로 타격하기 위해 에어실린더와 가속도계가 장착된 임팩트 해머를 사용하여 과실의 품질계수로서 가속도를 측정하였다.

수송과정 중에 과실은 많은 손상을 받을 수 있으며 손상의 주된 요인은 노면의 요철 또는 차량의 급정거 등에 의한 심한 진동이나 충격이다. 공산품의 G-factor는 수십 G에서 수백 G의 값을 가지나 과실과 같이 조직이 연한 생물체의 바이오 허용 충격지수는 이보다 훨씬 작은 값일 것이다. 과실의 생산지에서 소비지까지 과실을 운송하는 동안 진동이나 충격으로 발생하는 가속도를 측정하여 과실의 바이오 허용 충격지수와 비교분석하여 운송 중 과실의 손상을 줄이고 적정 포장설계를 통한 포장재 원가절감의 방안을 마련하는 것은 과실의 상품성 유지로 인해 결국 과수농가의 소득증대에도 크게 기여할 수 있는 매우 의미 있는 일일 것이다. 따라서, 본 연구에서는 한국의 대표적인 과실인 배와 사과를 공시하여 이 과실이 손상을 받지 않는 안전 낙하높이를 모델링하고 과실의 적정 포장설계를 위한 바이오 허용 충격지수를 추정하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 과실은 배(Niitaka)와 사과(Fuji)로서 2006년 10월에 일반농가에서 수확된 후 실험에 사용되기 전까지

약 2일 동안 저온저장($5 \pm 1^\circ\text{C}$, rh $85 \pm 5\%$) 되었던 과실이었다. 시료들의 기본적인 물성들은 표 1과 같으며, 각각의 과실은 실험에 사용되기 전에 실험실의 환경조건(15°C , rh 75%)에서 약 5시간 동안 적응을 시킨 후 실험에 사용하였다. 낙하실험에 사용된 배와 사과의 개수는 각각 50개이었다.

또한, 과실의 충격력을 계측하고 정점 가속도를 추정하는 모델을 구하기 위해 그림 1과 같은 자유 낙하장치를 이용하였다. 자유 낙하장치는 에어 실린더에 의해 과실 지지대가 순간적으로 아래쪽으로 이동하면서 과실이 자유낙하 하는 장치이며, 과실 위에는 경량이며, 유연성의 케이블을 가지는 가속도계를 부착하여 충격 가속도를 계측하고 충격시 로드셀(force transducer)에 의해 충격하중을 계측하였다. 배와 사과의 낙하실험시 낙하높이 수준은 20~200 mm에서 수행되었으며 이때 과실의 질량은 배의 경우 325~672 g, 사과의 경우 323~458 g이었다.

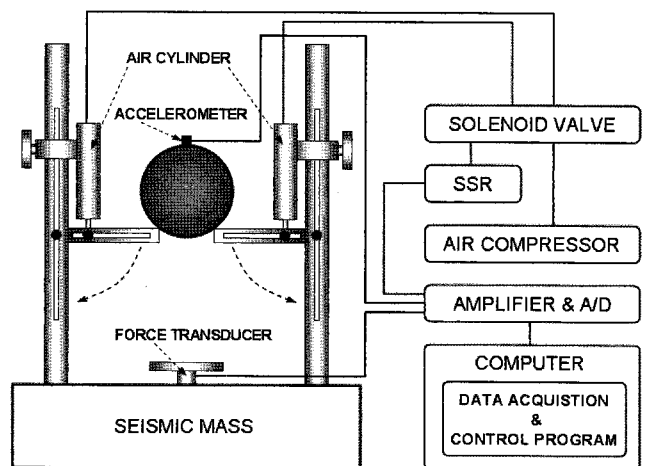


Fig. 1 Schematic diagram of the free drop tester.

3. 결과 및 고찰

가. 과실의 안전 낙하높이 추정

과실의 바이오 허용 충격지수를 추정하기 위해서는 과실과 같은 점탄성체(viscoelastic material)의 안전 낙하높이 즉, 과실이 자유낙하하여 충격에 의한 손상을 입지 않고 낙하할 수 있는 높이를 추정해야 하며, 과실의 안전 낙하높이는 다음과 같은 이론식과 실험을 통하여 추정 될 수 있다. 질량 m 인 과

Table 1 Harvesting date and physical characteristics of the fruits used in vibration tests.

Cultivar	Date of harvest	Volume (10^{-4} m^3)	Mass (kg)	True density (kg/m^3)
Pear (Niitaka)	2005. 10	6.722	0.66	978.26
Apple (Fuji)	2005. 10	3.619	0.30	830.75

실이 강체로 가정될 수 있는 바닥에 충돌하여 충격이 일어났을 때 운동량(momentum)과 역적(impulse)의 관계는 다음과 같다.

$$mv_1 - mv_2 = \int Fdt \quad (1)$$

- 여기서, m : 물체의 질량(kg)
- v₂ : 충격이 끝나는 속도(=0)(m/s)
- v₁ : 충격시작속도(v₀ = √2gh)(m/s)
- F : 충격력(N)

과실의 충격문제에서 충격력-시간 곡선은 과실이 점탄성체이기 때문에 최고 충격력을 중심으로 하여 좌우대칭으로 되지 않는다. 그러나 충격 접촉시간(t_c)의 반(1/2)에서 최고 충격력이 발생되고 충격력은 시간에 대하여 곡선적인 관계이지만 직선적인 관계가 있다고 가정하면 식 (1)의 우변의 적분은 최고 충격력에 대하여 t_c/2(time to peak force, t_{mf})까지만 하면 된다. 왜냐하면 충격력-시간 곡선에서 최고 충격력을 중심으로 하여 오른쪽은 압축 변형된 것이 회복되는 구간이므로 압축 변형량과는 관계가 없기 때문이다.

$$mv_0 = \int_0^{t_{mf}} Fdt \quad (2)$$

$$mv_0 = \int_0^{t_{mf}} Fdt = \frac{1}{2} F_m t_{mf} \quad (3)$$

$$F_m = \frac{2mv_0}{t_{mf}} = \frac{2m\sqrt{2gh}}{t_{mf}} \quad (4)$$

- 여기서, F_m : 최고충격력(N)
- t_{mf} : 최고충격력에 도달하는 시간(s)
- h : 낙하높이(m)

또한 최고 충격력(F_m)은 시간에 대해서 직선적으로 증가한다고 가정하면 식 (2)는 그림 2에서 보는바와 같이 삼각형 OF_mT_{mf}의 면적이므로 식 (3)과 같이 된다. 과실에 충격을 가하여 손상을 입지 않을 허용응력을 σ_p라 하면 이 값은 다음 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

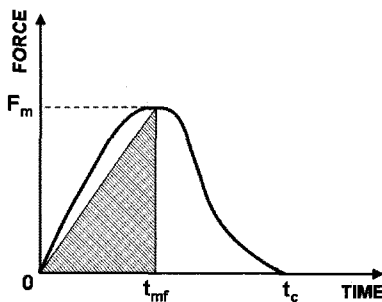


Fig. 2 Impact force-time curve of the fruits.

$$\sigma_p \leq \frac{F_m}{A} \quad (5)$$

- 여기서, σ_p : 과실이 충격으로 손상을 입지 않을 응력(Pa)
- A : 충격으로 생기는 접촉면적(m²)

반경이 R인 과실이 수평면에 충돌하여 생기는 접촉면적은 Hertz의 접촉이론으로부터 다음과 같은 식이 된다.

$$A = \pi a^2 = \pi \left[\frac{(3F_m K/2)}{(2/R)} \right]^{2/3} = 2.5933 (F_m K R)^{2/3} \quad (6)$$

$$= 2.6 (F_m K R)^{2/3} = 2.6 \left[\frac{F_m (1-\mu^2) R}{E} \right]^{2/3}$$

$$\text{여기서, } K = \frac{1-\mu^2}{E}$$

식 (4) 및 (6)을 식 (5)에 대입하고 낙하높이 h에 대하여 최고 충격력은 시간에 대하여 직선적으로 증가한다는 가정으로부터 이론적 안전 낙하높이의 식은 다음식과 같다.

$$h_t \leq \frac{0.9841 \sigma_p^6 (1-\mu^2)^4 R^4 t_c^2}{m^2 E^4} \quad (7)$$

- 여기서, h_t : 이론 안전 낙하높이(m)
- μ : 과실의 포아송비(무차원)
- R : 과실의 등가반경(equilibrium radius)(m)
- E : 과실의 탄성계수(Pa)
- t_c : 충격접촉시간(s)

낙하실험을 통하여 얻어진 충격력-시간 곡선을 적분한 식 (2)를 식 (3)으로 나누어 준 값을 N₁이라 하면 식 (7)은 다음과 같은 식이 되고 이 식으로 실제의 안전 낙하높이를 추정할 수 있다.

$$h_a \leq \frac{0.9841 N_1^2 \sigma_p^6 (1-\mu^2)^4 R^4 t_c^2}{m^2 E^4} \quad (8)$$

- 여기서, h_a : 실제 안전 낙하높이(m)

나. 과실의 정점 가속도 모델 개발

과실의 바이오 허용 충격지수를 구하기 위해서는 낙하충격으로 발생하는 정점가속도를 구해야 한다. 과실의 낙하 충격 실험에서 발생하는 정점가속도에 영향을 미치는 주요인자로는 낙하높이와 과실의 질량으로 알려져 있다(박, 2001). 따라서 크기가 다양한 과실에 대하여 낙하실험을 수행하여 정점가속도에 영향을 크게 미친다고 알려진 낙하높이와 과실의 질량을 변수로 하는 정점가속도 추정모델을 개발하였다.

모델개발에는 회귀분석용 패키지인 DataFit(Oakdale Engineering Co., ver. 8.0, USA)을 이용하였으며 여기서는 낙하높이와 과실의 질량을 변수로 하는 조합가능한 정점가속도에 대한 회귀식을 분석하였다. 정점가속도 모델의 각 계수를 나타낸 표 2와 3에서 보논바와 같이 배의 경우, 정점가속도 모델

의 결정계수값이 0.9998이었고 사과와 배의 경우 0.9992로 매우 높게 나타났다. 또한 배와 사과의 정점가속도에 대한 반응표면을 그림 3에 도시하였다.

다음으로 과실이 낙하하여 손상을 입지 않을 안전 낙하높이를 구하였다. 안전 낙하높이는 식 (8)에서 보논바와 같이

Table 2 Coefficients of multiple regression model for the peak acceleration of the pear.

Variables	$a_m = a + b \times DH + c \times DH^2 + d \times DH^3 + e \times MA + f \times MA^2 + g \times MA^3 + h \times MA^4$				Coefficient of multiple determination (R^2)
	Coefficients	Standard error	t-ratio	Prob (t)	
<i>a</i>	-10.3680	9.0892	-1.1406	0.28058	0.9998
<i>b</i>	12.8005	11.2110	1.1417	0.28015	
<i>c</i>	16.4719	114.0288	0.1444	0.88801	
<i>d</i>	-149.1842	329.5512	-0.4526	0.66044	
<i>e</i>	85.4255	69.7225	1.2252	0.24857	
<i>f</i>	-250.5536	193.8672	-1.2923	0.22528	
<i>g</i>	335.4493	238.4736	1.4066	0.18984	
<i>h</i>	-167.4764	111.5187	-1.5017	0.16405	

* Note: a_m = peak acceleration (G), DH = drop height (m), MA = mass of Pear (kg), $a-h$ = constants

Table 3 Coefficients of multiple regression model for the peak acceleration of the apple.

Variables	$a_m = a + b \times DH + c \times DH^2 + d \times DH^3 + e \times MA + f \times MA^2 + g \times MA^3 + h \times MA^4$				Coefficient of multiple determination (R^2)
	Coefficients	Standard error	t-ratio	Prob (t)	
<i>a</i>	196.0757	103.4196	1.8959	0.06733	0.9992
<i>b</i>	7.5355	4.2089	1.7903	0.08317	
<i>c</i>	-45.0258	56.0864	-0.8027	0.42821	
<i>d</i>	296.0075	194.3447	1.5231	0.13787	
<i>e</i>	-2373.1398	1051.7276	-2.2564	0.03124	
<i>f</i>	10289.8836	3992.9121	2.5770	0.01495	
<i>g</i>	-19112.6037	6715.4227	-2.8460	0.00778	
<i>h</i>	12978.5206	4223.5924	3.0728	0.00439	

* Note: a_m = peak acceleration (G), DH = drop height (m), MA = mass of apple (kg), $a-h$ = constants

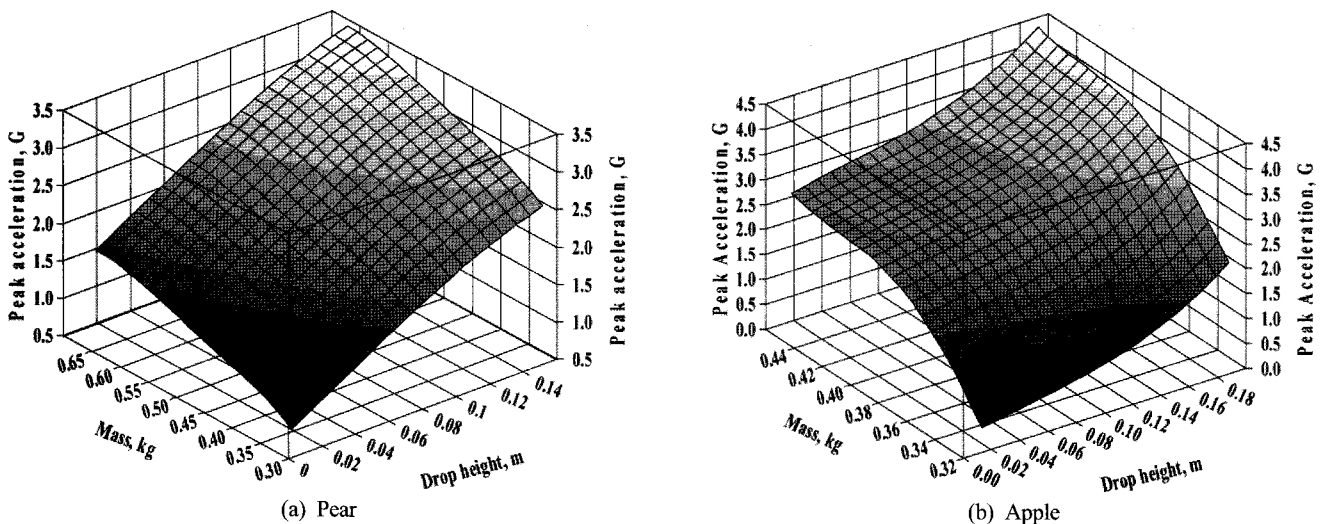


Fig. 3 Response surface of the peak acceleration of the fruits as a function of mass and drop height.

과실의 탄성계수(E), 포아송비(μ), 충격접촉시간(t_c), 과실의 등가직경(R) 및 질량(m)에 따라 다르기 때문에 본 연구에서는 이들의 각 물리량들을 실험범위 내의 최대, 최소 및 그 평균치로 구분하여 안전 낙하높이를 구하였다. 또한 이때 손상은 생물체 항복강도(σ_b)를 기준(정, 1999)으로 하였으며, 이 값도 실험의 범위에서 위와 같이 3부류로 구분하였으며 충격량의 이론치에 대한 실측치의 비인 N_1 은 배에서 1.147, 사과에서 1.165로 하여 안전 낙하높이를 추정하였다.

배와 사과에 대한 안전 낙하높이를 표 4와 5에 각각 나타내었다. 표들에서 보는바와 같이 과실의 안전 낙하높이는 포와 송비, 등가직경, 충격 접촉시간 및 질량이 증가함에 따라 증가하였고, 과실의 탄성계수와 생물체 항복강도가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향이었다. 이러한 현상은 이론적 분석과는 상반되는 결과로서 그 원인은 생물체 항복강도가 크거나 질량이 큰 과실의 경우는 충격 시 충격 접촉시간이 길어지

기 때문인 것으로 판단되었다. 대체로 배와 사과의 안전낙하높이는 각각 10~50 mm와 30~80 mm범위로 나타났다.

다. 과실의 바이오 허용 충격지수 추정

과실의 바이오 허용 충격지수는 배와 사과의 정점가속도 모델에 이들 과실의 안전낙하높이와 질량을 각각 대입하여 추정하였으며, 그 결과를 표 6와 7에 각각 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 배의 바이오 허용 충격지수는 약 0.74~2.29 G 범위이었으며 사과의 경우는 약 0.51~2.98 G로 배보다 약간 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 사과는 배보다 조직이 약간 단단하여 같은 충격에서 손상을 배보다는 적게 입는다는 일반적으로 알려진 사실과도 잘 일치하는 결과이었다. 이러한 결과치를 토대로 과실이 충격에 의해 받는 손상의 기준을 제시함으로써 적정 포장설계가 가능하게 될 것이다.

Table 4 Estimated allowable drop height based on the bioyield strength of the pear.

		E_1			E_2			E_3		
		σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3	σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3	σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3
h_a (mm)	m_1, t_{c1}, R_1	23.14	24.52	22.71	16.78	18.01	16.76	12.59	13.54	12.68
	m_2, t_{c2}, R_2	35.09	37.69	35.42	25.98	27.91	26.18	20.04	20.96	19.78
	m_3, t_{c3}, R_3	52.79	56.80	53.28	38.97	41.95	39.61	30.02	31.84	29.91

Note: $E_1 = 1138.631$ (kPa), $E_2 = 1240.693$ (kPa), $E_3 = 1342.754$ (kPa), $\sigma_{p1} = 181.542$ (kPa), $\sigma_{p2} = 191.649$ (kPa), $\sigma_{p3} = 201.756$ (kPa)
 $\mu_1 = 0.25, \mu_2 = 0.35, \mu_3 = 0.45, m_1 = 0.325$ (kg), $m_2 = 0.499$ (kg), $m_3 = 0.672$ (kg), $t_{c1} = 6.980$ (ms), $t_{c2} = 7.725$ (ms),
 $t_{c3} = 8.470$ (ms), $R_1 = 5.033(10^{-2}$ m), $R_2 = 5.423(10^{-2}$ m), $R_3 = 5.812(10^{-2}$ m)

Table 5 Estimated allowable drop height based on the bioyield strength of the apple.

		E_1			E_2			E_3		
		σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3	σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3	σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3
h_a (mm)	m_1, t_{c1}, R_1	56.40	52.13	45.93	51.00	47.14	41.53	42.98	39.73	34.99
	m_2, t_{c2}, R_2	69.56	64.29	56.64	62.90	58.14	51.22	53.00	48.99	43.16
	m_3, t_{c3}, R_3	81.12	74.99	66.06	73.36	67.81	59.73	61.82	57.14	50.34

Note: $E_1 = 1960.162$ (kPa), $E_2 = 2010.141$ (kPa), $E_3 = 2098.025$ (kPa), $\sigma_{p1} = 312.73$ (kPa), $\sigma_{p2} = 322.73$ (kPa), $\sigma_{p3} = 336.61$ (kPa)
 $\mu_1 = 0.25, \mu_2 = 0.35, \mu_3 = 0.45, m_1 = 0.323$ (kg), $m_2 = 0.361$ (kg), $m_3 = 0.458$ (kg), $t_{c1} = 4.701$ (ms), $t_{c2} = 5.260$ (ms),
 $t_{c3} = 6.158$ (ms), $R_1 = 2.078(10^{-2}$ m), $R_2 = 2.514(10^{-2}$ m), $R_3 = 3.409(10^{-2}$ m)

Table 6 Allowable bio-shock fragility index estimated on the basis of bioyield strength of the pear.

		E_1			E_2			E_3		
		σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3	σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3	σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3
I_{bf}	m_1, t_{c1}, R_1	0.8806	0.8989	0.8748	0.7961	0.8124	0.7958	0.7408	0.7533	0.7424
	m_2, t_{c2}, R_2	1.6305	1.6653	1.6349	1.5085	1.5343	1.5112	1.4294	1.4416	1.4259
	m_3, t_{c3}, R_3	2.2354	2.2886	2.2419	2.0507	2.0906	2.0593	1.9308	1.9551	1.9293

Note: $E_1 = 1138.631$ (kPa), $E_2 = 1240.693$ (kPa), $E_3 = 1342.754$ (kPa), $\sigma_{p1} = 181.542$ (kPa), $\sigma_{p2} = 191.649$ (kPa), $\sigma_{p3} = 201.756$ (kPa)
 $\mu_1 = 0.25, \mu_2 = 0.35, \mu_3 = 0.45, m_1 = 0.325$ (kg), $m_2 = 0.499$ (kg), $m_3 = 0.672$ (kg), $t_{c1} = 6.980$ (ms), $t_{c2} = 7.725$ (ms),
 $t_{c3} = 8.470$ (ms), $R_1 = 5.033(10^{-2}$ m), $R_2 = 5.423(10^{-2}$ m), $R_3 = 5.812(10^{-2}$ m), I_{bf} = allowable bio-shock fragility index (G)

Table 7 Allowable bio-shock fragility index estimated on the basis of bioyield strength of the apple.

		E_1			E_2			E_3		
		σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3	σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3	σ_{p1}, μ_1	σ_{p2}, μ_2	σ_{p3}, μ_3
I_{bf}	m_1, t_{c1}, R_1	0.6234	0.6009	0.5683	0.5949	0.5746	0.5449	0.5527	0.5354	0.5097
	m_2, t_{c2}, R_2	2.0184	1.9895	1.9486	1.9819	1.9565	1.9200	1.9294	1.9084	1.8776
	m_3, t_{c3}, R_3	2.9805	2.9443	2.8942	2.9349	2.9038	2.8601	2.8712	2.8463	2.8105

Note: $E_1 = 1960.162$ (kPa), $E_2 = 2010.141$ (kPa), $E_3 = 2098.025$ (kPa), $\sigma_{p1} = 312.73$ (kPa), $\sigma_{p2} = 322.73$ (kPa), $\sigma_{p3} = 336.61$ (kPa)
 $\mu_1 = 0.25$, $\mu_2 = 0.35$, $\mu_3 = 0.45$, $m_1 = 0.323$ (kg), $m_2 = 0.361$ (kg), $m_3 = 0.458$ (kg), $t_{c1} = 4.701$ (ms), $t_{c2} = 5.260$ (ms),
 $t_{c3} = 6.158$ (ms), $R_1 = 2.078(10^{-2})$ m, $R_2 = 2.514(10^{-2})$ m, $R_3 = 3.409(10^{-2})$ m, I_{bf} = allowable bio-shock fragility index (G)

4. 결론

유통 중인 과실류의 포장상자 적정 포장설계 시 충격에 의한 손상의 기준인 바이오 허용 충격지수를 구하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 과실의 안전낙하높이(DH)와 질량(MA)을 변수로 하는 과실의 정점가속도에 대한 모델을 다음과 같은 회귀식으로 개발하였다.

$$a_m = a + b \times DH + c \times DH^2 + d \times DH^3 + e \times MA + f \times MA^2 + g \times MA^3 + h \times MA^4$$
- (2) 개발된 정점가속도 모델을 이용하여 과실의 바이오 허용 충격지수를 분석하였던 결과 배는 0.74-2.29 G, 사과는 0.51~2.98 G 범위이었다.
- (3) 본 연구에서 측정된 과실의 바이오 허용 충격지수를 토대로 과실이 충격에 의해 받는 손상의 기준을 제시함으로써 적정 포장설계가 가능하게 될 것이다.

참고 문헌

1. Chen, P., M. Ruiz., F. Lu and A. A. Kader. 1987. Study of impact and compression damage on asian pears. Trans. of the ASAE 30(4):1193-1197.
2. Delwiche, M. J., S. Tang and J. J. Mehlschau. 1989. An impact force response fruit firmness sorter. Trans. of the ASAE 32(1): 321-326.
3. Delwiche, M. J. and Y. Sarig. 1991. A probe impact sensor for fruit firmness measurement. Trans. of the ASAE 34(1): 187-192.
4. Jung, H. M. 1999. Mechanical Properties of Selected Fruits and Vegetables. Chungnam National University Master Thesis.
5. Park, I. K. 2001. Impact Properties of the Pears. Chungnam National University Master Thesis.
6. Rohrbach, R. P. 1975. On the rapid measurement of blueberry firmness. In Proc. Workshop on Design Applications of Mechanical Properties of Solid Food Materials, 7-8. University Park, Pa.: Pennsylvania State University.
7. Rohrbach, R. P., J. E. Franke and D. H. Willits. 1982. A firmness sorting criterion for blueberries. Trans. of the ASAE 25(2):261-265.
8. Reyes, M. U., R. E. Paull, M. R. Williamson and L. D. Gautz. 1996. Ripeness determination of 'solo' papaya (*Carica papaya* L.) by impact force. Applied Eng. in Agric. 12(6):708-708.
9. Wan, Y. N., M. H. Yen and C. Ay. 1997. Nondestructive maturity inspection of fruits and vegetable by impact. J. Agric. Machinery 6(3):21-33.
10. Zhang, X., M. L. Stone, D. Chen, N. O. Maness and G. H. Brusewitz. 1994. Peach firmness determination by puncture resistance, drop impact, and sonic impulse. Trans. of the ASAE 37(2):495-500.